

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01872

研究課題名（和文）ナノ組織制御超伝導線を用いた縦磁界直流電力輸送ケーブルの高性能化に関する研究

研究課題名（英文）Research on improving the performance of longitudinal magnetic field DC power transmission cables using nanostructured superconducting wires

研究代表者

木内 勝（Kiuchi, Masaru）

九州工業大学・大学院情報工学研究院・准教授

研究者番号：90304758

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、超伝導線材の電流通電の方向に磁界を平行に加えることにより電流容量が大きく増加する縦磁界効果を用いて、軽量でコンパクトな直流電力輸送ケーブルの高性能化のため2つの観点から研究を行った。1つ目は線材の縦磁界下で線材の臨界電流特性の決定機構解明であり、2つ目はケーブルの最適利用環境について調べた。縦磁界下で臨界電流特性を向上させるためには、超伝導層を歪ませないような小さな欠陥の導入が有効であることが明らかになった。更に、ケーブルの利用環境としては、冷却コストの点からも、液体窒素を減圧した過冷却下での運用の方が液体窒素冷却に比べて2倍の電流容量が達成できることが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

超伝導電力送電には超伝導ケーブル自体のコストだけでなく、付帯設備などの初期コストが必要なため阻害要因となっているが、本研究の新しい技術を利用した直流電力輸送ケーブルは、液体窒素冷却のみでなく、地中に埋設された断熱二重層の管路内の過冷却液体窒素下におけるケーブルの高性能化を明らかにしている。また、このような高性能な電力輸送ケーブルは、現在注目されている小型核融合炉や電気航空機への利用も可能にする。更に、本研究で明らかにした線材の開発が可能になると、高性能化ばかりでなく高密度化も可能になり利用線材の量を減らすことができ、ケーブル作製のコストの低減にも大きく貢献できる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we conducted research from two perspectives to improve the performance of lightweight and compact DC power transmission cables by using the longitudinal magnetic field effect, in which the current capacity is greatly increased by applying a magnetic field parallel to the direction of current flow in superconducting wires. The first was to clarify the mechanism that determines the critical current characteristics of the wires under a longitudinal magnetic field, and the second was to investigate the optimal environment for using the cable. It was found that the introduction of small defects that do not distort the superconducting layer is effective in improving the critical current characteristics under a longitudinal magnetic field. As for the environment for using the cable, it was found that a current capacity twice as high can be achieved when the cable is supercooled by reducing the pressure of liquid nitrogen compared to when it is cooled with liquid nitrogen.

研究分野：超伝導応用

キーワード：直流電力ケーブル 臨界電流密度 縦磁界効果 磁束ピンニング 電流容量

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

超伝導線材を応用機器へ利用する際の重要な特性に臨界電流  $I_c$  がある。この  $I_c$  は電気抵抗なしで流せる最大の電流で、その電流密度を臨界電流密度  $J_c$  という。特に高密度、高効率で軽量の電力輸送にはこの  $J_c$  の向上が必須であり、現在、ナノ組織制御技術を用いて電流量が大きく増加するピン(欠陥)を導入したRE(Rare-Earth)系コート超伝導線材(以下RE系コート線材)の開発が進められている。一方でこの  $J_c$  特性は、電流を通電する方向に平行に磁界を加える縦磁界下では、電流と磁界が垂直になる一般の利用である横磁界の  $J_c$  に比べて大きく増加し、さらに磁界の増加と共に  $J_c$  が増加することが知られている。この縦磁界下での  $J_c$  の向上のために、ナノ技術を用いて人工的にピンの導入が行われている[1,2]が、 $J_c$  が増加する場合もあれば、逆に低下する場合もあり、縦磁界下での  $J_c$  の特性決定機構が解明されていない。

一方でこの高い縦磁界下での  $J_c$  を用いた高性能な縦磁界直流電力輸送ケーブルの開発が進められている[3,4]。このケーブルは内側導体が行きの電流、シールド層が帰りの電流が流れる同軸構造で、帰りの電流が作る自己磁界が内側導体の縦磁界になるような構造である。従って、内側導体が縦磁界下になり高い  $I_c$  になる。ただし、さらに高性能化を実現するためには縦磁界下での高い  $I_c$  である。更に、直流電力輸送ケーブルの構造及び運転環境についての議論はほとんど行われていない。このような電力輸送ケーブルは、地中に埋設された断熱二重層の管路内に敷設され、管路内が減圧された過冷却液体窒素下での運用が想定されるが、この利用環境での縦磁界直流電力輸送ケーブルの高性能化に関する研究もまだ進められていない。

### 2. 研究の目的

本研究では学術的背景を踏まえて、下記を目標とした。

- (1) RE系コート線材の縦磁界下でのピンニング機構解明：縦磁界直流電力輸送ケーブルに用いる長尺線材の人工ピンの構造、 $J_c$  の決定機構解明
- (2) 縦磁界ケーブルの高性能化のための利用環境の解明

### 3. 研究方法

(1) RE系コート線材の縦磁界下でのピンニング機構解明：縦磁界直流電力輸送ケーブルに用いる長尺線材の人工ピンの構造、 $J_c$  の決定機構解明に関しては、市販されているケーブルを作製可能な長尺RE系コート線材で、人工ピンありFujikura線材、人工ピンなしFujikura線材、人工ピンありFradayFactory線材、人工ピンなしFradayFactory線材、人工ピンありSuperPower線材の5種類を用いた。この長尺線材から切り出した線材の縦磁界下での  $I_c$  や  $J_c$  は液体窒素中での直流四端子法を用いて測定を行った。また、線材に加える縦磁界はBi-2223超伝導コイルを用いた。さらに、線材の結晶構造を調べるためにTEM：透過電子顕微鏡を用いて組織観察を行い、 $J_c$  の縦磁界依存性と組織観察から縦磁界下での  $J_c$  の決定機構を調べた。

(2) 市販されている長尺RE系コート線材を用いて、縦磁界下での臨界電流  $I_c$  特性を考慮して700 mmの内側導体の模擬ケーブルを設計、作製した。ケーブルの通電特性は6000 Aまで通電可能な直流原電を用いて直流四端子法を用いて測定した。過冷却下での評価を行うために、過冷却容器を設計し開発し、液体窒素下と過冷却下: 67 Kでの評価を行った。また、本評価はケーブルの内側導体のみなので、帰りの電流が流れるシールド層が作る縦磁界を、Bi-2223超伝導コイルで模擬して加えて測定を行った。

#### 4. 研究成果

##### (1) RE系コート線材の縦磁界下でのピンニング機構解明

図1にRE系コート線材の77 K及び65 Kにおけるゼロ磁界での臨界電流密度  $J_{c,s.f}$  で規格化した  $J_c/J_{c,s.f}$  の縦磁界依存性を示す。77 Kでは人工ピンなしFujikura線材の  $J_c/J_{c,s.f}$  が、0.3 T まで増加していることがわかる。一方で他の線材に関しては0.1 Tの磁界までは  $J_c$  値は一定の値を示すが、それ以降の磁界では単調に減少する。また、65 Kでは人工ピンありFaradayFactory線材の  $J_c$  が大きく増加し人工ピンなしFujikura線材と同程度の特性となった。このように作製方法、人工ピンあり、なしや温度で複雑に特性が変化するが、2つの温度領域では人工ピンなしFujikura線材で大きな  $J_c$  が得られることが確認できた。そこで、人工ピンなしとあり線材の断面TEM観察を行った。図2に人工ピンなしFujikura線材と人工ピンありSuperPower線材のTEM画像を示す。この断面観察から両線材とも  $\text{Eu}_2\text{O}_3$  の層が膜厚方向に80~140 nmの間隔で分散しており、他の線材でも確認ができた。従って、断面観察に著しい違いは人工ピンの有無である。一般的な横磁界の場合は、超伝導体に侵入した磁束線がLorentz力を受けて動き出すのを、ピンが動きを止める。一方で、縦磁界においても磁束線の動きを止めるためにはピンが必要になるが、横磁界と異なり電流と磁界の平行度も重要になってくる。現在導入されているc軸方向に長く成長するロッド状の人工ピンは、超伝導層への歪を与えることが知られており、この歪は電流の流れを変えるために、ピン近傍の電流と磁界の平行度は低下する。すなわちロッド形状のようなピンは平行度を乱すために大きな  $J_c$  及び  $I_c$  が得られない、従って、超伝導層への歪が少ない粒状のピンの導入が有効であることがわかる。しかし、現在市販されている線材に導入されている人工ピンはサイズも大きく、超伝導層に歪を与えてしまうために、縦磁界下では大きな  $J_c$  及び  $I_c$  が得られない。従って、ケーブルの高性能化には超伝導層に歪を与えないような小さな粒状ピンの導入が必要である。

##### (2) 市販されているRE系コート線材を用いた縦磁界下での縦磁界直流電力輸送ケーブルの液体窒素及び過冷却での特性評価及び最適化

本研究ではケーブル特性を評価するために、現状では縦磁界下で一番高い  $J_c$  及び  $I_c$  が得られる長尺の人工ピンなしFujikura線材を用いて、ケーブル特性を調べた。はじめにケーブルに線材の縦磁界特性を考慮するために  $J_c$  の縦磁界特性を評価した。図3に線材一枚の  $J_c$  の縦磁界特

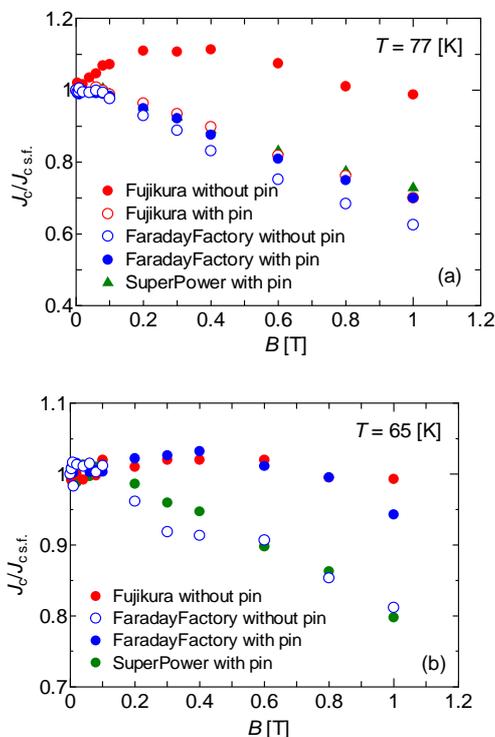


図1：市販されているRE系コート線材の臨界電流密度の縦磁界依存性。(a)77 K, (b) 67 K

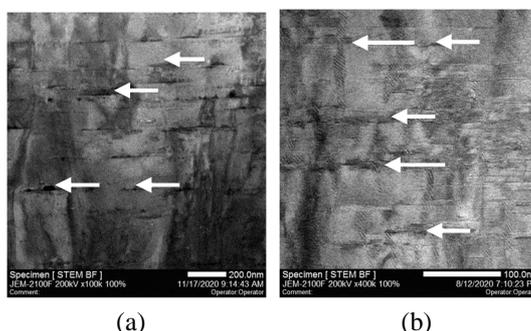


図2：RE系コート線材のTEM画像。(a)人工ピンなしFujikura線材(b)人工ピンありSuperPower線材。矢印は  $\text{Eu}_2\text{O}_3$  の層を示す。

性を示す。77 K の  $J_c$  に比べて、67 K では約 2 倍の  $J_c$  が得られた。なお、同じ線材であるが、線材の長さが異なるために若干  $J_c$  の違いを示した。この  $J_c$  の縦磁界依存性をケーブル設計に考慮するために、図 3 に示す 5 次の近似曲線でフィッティングし、この依存性を考慮しての 1 層の縦磁界直流電力輸送ケーブルを設計[5]し、作製を行った。図 4 に作製した 1 層の縦磁界直流電力輸送ケーブルを、表 1 にケーブルの諸元を示す。

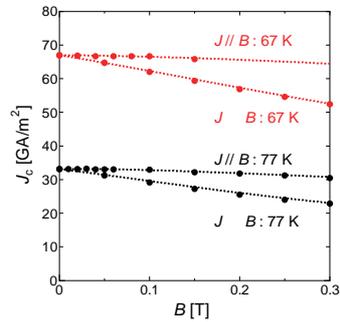


図 3 Fujikura 社製の人工ピンなし RE 系コート線材の 77 K 及び 67 K の臨界電流密度の縦磁界依存性。シンボルが実験結果で点線は近似曲線。

作製したケーブルを液体窒素及び過冷却下で四端子法を用いてケーブルの電流容量  $I_{ct}$  の縦磁界の依存性を図 5 に示す。シンボルが実験結果で、点線が設計値である。定量的によい一致が得られた。自己磁界下での  $I_{ct}$  は、77 K では 2003 A、67 K では 3951 A となり、温度低下により  $I_{ct}$  が 2 倍となった。この値は、線材 1 枚の温度低下による  $J_c$  の増加率と同程度の値であり、過冷却下での  $J_c$  増加がそのまま 67 K でも反映されることが確認できた。更に、自己磁界からの増加率は線材の増加率が大きくないために十分な増加でないが、例えば、67 K では 0.2 T の磁界までは  $I_{ct}$  は増加することが確認でき、自己磁界の影響による  $I_{ct}$  の減少がこのケーブルにはないことがわかる。

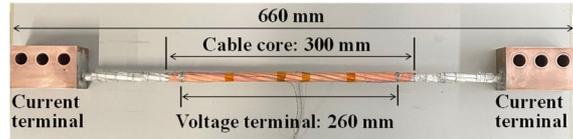


図 4 作製した 1 層の縦磁界直流電力輸送ケーブル。

表 1：作製したケーブルの諸元

使用線材	Fujikura 社製 RE 系コート線材
線材枚数	8
フォーマ直径 [mm]	10
巻き角 [°]	10
導体部長さ [mm]	300
ケーブル全長 [mm]	660

したがって、現状で超伝導ケーブルの運用コストを考えると液体窒素の過冷却下が最適で、この温度領域での最適化が重要である。

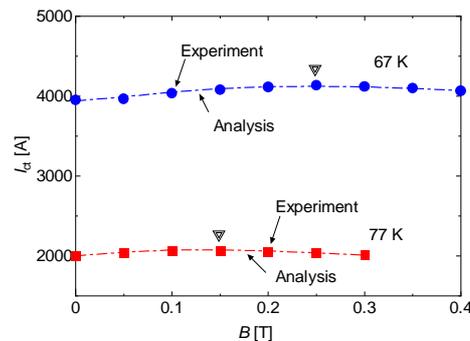


図 5 縦磁界直流電力輸送ケーブルの電流容量  $I_{ct}$  の縦磁界依存性。シンボルが実験結果で点線が設計値。

今回の研究では、現在導入されているロッド状の人工ピンでなく超伝導層に歪を与えないような微細なピンを導入した線材の開発が重要で、これを用いることで、高効率で高性能な縦磁界直流電力輸送ケーブルが可能なることを示した。

#### < 引用文献 >

- [1] A. Tsuruta et al., JJAP 53 (2014) 078003.
- [2] R. Kido, M. Kiuchi, E.S. Otabe, T. Matsushita, A.K. Jha, K. Matsumoto, Physics Procedia, **81** (2016) pp. 117-120.
- [3] T. Matsushita et al.: Supercond. Sci. Technol. 25 (2012) 125009 (8pp).
- [4] T. Matsushita and M. Kiuchi, Progress in Superconductivity and Cryogenics Vol.19, No.3 (2017) p.1.
- [5] V. S. Vyatkin, M. Kiuchi, E. S. Otabe, M. Ohya, and T. Matsushita: Supercond. Sci. Technol. 28 (2015) 015011.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計24件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 濱本拓郎, 豊岡寛大, 木内 勝
2. 発表標題 ツイストしたRE系コート線材の縦磁界下における臨界電流特性
3. 学会等名 2024年 第71回 応用物理学会 春季学術講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 伊藤 駿汰, 山本 拓実, 木内 勝, 堀出 朋哉, 吉田 隆
2. 発表標題 膜厚の異なるVLS-YBCO膜の縦磁場中臨界電流密度
3. 学会等名 2024年 第71回 応用物理学会 春季学術講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 伊藤 駿汰, 一瀬 中, 堀出 朋哉, 吉田 隆
2. 発表標題 Vapor-Liquid-Solid成長法を用いて作製したBaSn03添加YBa2Cu3Oy膜の磁場中超伝導特性
3. 学会等名 2024年 第71回 応用物理学会 春季学術講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 島田涼平, 木内 勝
2. 発表標題 縦磁界下におけるREBCO線材の表面電界の評価
3. 学会等名 2023年度若手イベント 支部研究成果発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山口稔平, 濱本拓郎, 西島太一, 木内 勝
2. 発表標題 RE系超電導線材を用いた縦磁界直流超電導ケーブルの通電特性
3. 学会等名 2023年度若手イベント 支部研究成果発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 濱本拓郎, 木内 勝, 山崎春太郎, 吉田 隆
2. 発表標題 スクライピング加工されたRE系コート線材を用いた超電導電流導体の通電特性評価
3. 学会等名 2023年度春季低温工学・超電導学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山口稔平, 濱本拓郎, 木内 勝
2. 発表標題 短尺の直流超電導ケーブルの特性評価
3. 学会等名 2023年度春季低温工学・超電導学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山口稔平, 濱本拓郎, 木内勝, 吉田隆
2. 発表標題 人工ピン入りRE系超伝導線材を用いた二層直流超伝導ケーブルの通電特性
3. 学会等名 2022年度春季低温工学超電導学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 有田 知徳, 一野 祐亮, 吉田 隆
2. 発表標題 VLS成長法におけるREBCO薄膜の成長形態のシミュレーション
3. 学会等名 2022年度秋季応用物理学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 美和 虎之介, 吉田 隆
2. 発表標題 高速Vapor Liquid Solid 成長法により作製したYBa <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>y</sub> 膜の表面形態と成長速度
3. 学会等名 2022年度秋季応用物理学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 美和 虎之介, 吉田 隆
2. 発表標題 RtRシステムを用いたVapor-Liquid-Solid-YBa <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>y</sub> 厚膜線材の作製プロセス
3. 学会等名 2022年度秋季低温工学超電導学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 島田涼平, 木内 勝
2. 発表標題 縦磁界下におけるREBCO線材の表面電界の評価
3. 学会等名 2022年度秋季低温工学超電導学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tomonori Arita, Yusuke Ichino, Yutaka Yoshida
2. 発表標題 Growth mechanism of BaM03-doped REBa2Cu3Oy thin films by Vapor-Liquid-Solid technique simulated by Monte Carlo simulation
3. 学会等名 35rd international Symposium on Superconductivity 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tomoki Osada, Yusuke Ichino, Yutaka Yoshida
2. 発表標題 Geometry measurement of an ablation plasma in the pulsed laser deposition method and effective investigation for using Bayesian optimization
3. 学会等名 35rd international Symposium on Superconductivity 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伊藤 駿汰, 木内 勝, 美和 虎之介, 尾崎 壽紀, 吉田 隆
2. 発表標題 膜厚の異なるVLS-YBCO厚膜の臨界電流密度
3. 学会等名 2023年第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 木内 勝, 竹内 竜徳, 伊藤 駿汰, 尾崎 壽紀, 吉田 隆
2. 発表標題 超伝導層の厚いY系コート線材の臨界電流密度特性
3. 学会等名 2023年第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 吉田隆, 日比野拓, 土屋雄司, 一野祐亮, 高橋 誠, 田橋正浩, 木内勝, 一瀬 中
2. 発表標題 直流送電応用に向けたBaHfO <sub>3</sub> 添加YBa <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>y</sub> 高温超伝導線材の縦磁場中超伝導特性向上及び導体作製
3. 学会等名 第101回 2021年度春季 低温工学・超電導学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 美和虎之介, 伊東智寛, 土屋雄司, 吉田隆
2. 発表標題 Vapor-Liquid-Solid 成長法で 作製した厚膜YBa <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>y</sub> 線材の磁場中臨界電流
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山村太貴, 土屋雄司, 一野祐亮, 一瀬中, 吉田隆
2. 発表標題 基板自己抵抗加熱方式を用いて様々な基板温度で作製したBaHfO <sub>3</sub> 添加YBa <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>y</sub> 薄膜の磁場中超伝導特性
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山本拓実, 一野祐亮, 土屋雄司, 吉田隆
2. 発表標題 BaHfO <sub>3</sub> 添加量及び成膜速度を変化させることによるREBa <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>y</sub> 線材の巨視的ピンニング力の変化
3. 学会等名 第102回 2021年度秋季 低温工学・超電導学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tomohiro Ito, Toranosuke Miwa, Yuji Tsuchiya, Yutaka Yoshida, Yusuke Ichino, Ataru Ichinose
2. 発表標題 "Critical Current in the magnetic field of YBa2Cu3Oy Coated Conductors with ultra-thick films fabricated by Vapor-Liquid-Solid growth technique"
3. 学会等名 Coated Conductors for Applications Workshop 2021, on line (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Akihito Mizuno, Yuji Tsuchiya, Satoshi Awaji, Yutaka Yoshida
2. 発表標題 Rectification at Various Temperatures in YBa2Cu3Oy Coated Conductors With PrBa2Cu3Oy Buffer Layers]
3. 学会等名 MT27, 27th International Conference on Magnet Technology (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Toranosuke Miwa, Daiki Ebara, Tomohiro Ito, Yuji Tsuchiya, Yutaka Yoshida Yusuke Ichino, Ataru Ichinose
2. 発表標題 Critical current in the magnetic field of BaHfO3-doped YBa2Cu3Oy coated conductors with ultra-thick films fabricated by Vapor-Liquid-Solid growth technique
3. 学会等名 34rd international Symposium on Superconductivity 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Daiki Yamamura, Tomohiro Ito, Yuji Tsuchiya, Yusuke Ichino, Ataru Ichinose, Yutaka Yoshida
2. 発表標題 Isotropic flux pinning properties by fireworks structure of BaHfO3 nanorods in YBa2Cu3Oy coated conductors fabricated by pulsed laser deposition with substrate self-heating technique
3. 学会等名 34rd international Symposium on Superconductivity 2021, (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	吉田 隆  (Yoshida Yutaka)  (20314049)	名古屋大学・工学研究科・教授   (13901)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------